

Tomographie in der inneren Magnetosphäre

H. Korth, M. F. Thomsen und W. S. Phillips
Los Alamos National Laboratory
Los Alamos, New Mexico, USA

K.-H. Glaßmeier
Institut für Geophysik der Technischen Universität Braunschweig
Braunschweig, Germany

D. J. McComas
Southwest Research Institute
San Antonio, Texas, USA

16. Januar 2001

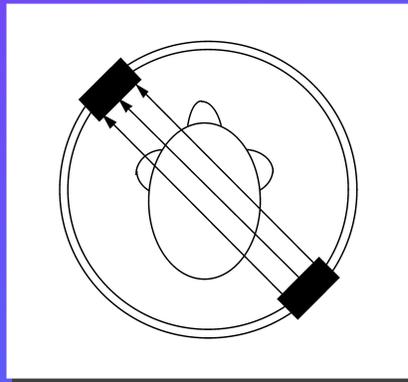


Inhalt

- Grundidee der Tomographie.
- Beschreibung der Parameter.
- Systeme linearer Gleichungen.
- Nebenbedingungen.
- Vorwärtsrechnung und Inversion.
- Inversion der MPA-Daten.
- Diskussion der Ergebnisse.
- Zusammenfassung.

Grundidee der Tomographie

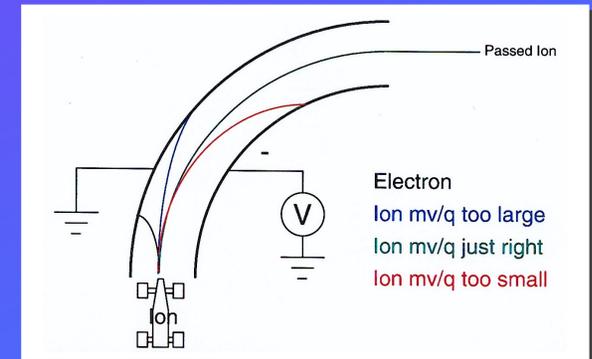
- Ziel: Eine physikalische Meßgröße lokal von nicht-lokal gemessenen Daten zu bestimmen.



- Spezielle Anwendung: Bestimmung der Neutralteilchendichte in der inneren Magnetosphäre anhand...
 1. einer Statistik der Protonen-Phasenraum-dichte ermittelt von Messungen des MPA Instrumentes an Bord der geostationären Satelliten von Los Alamos,
 2. einem globalen Driftschema berechnet von Modellen für das globale elektrische und magnetische Feld,
 3. wobei wir annehmen, daß Verluste in der Phasenraum-dichte nur durch Ladungsaustausch der Protonen mit exosphärischen Neutralteilchen entstehen.

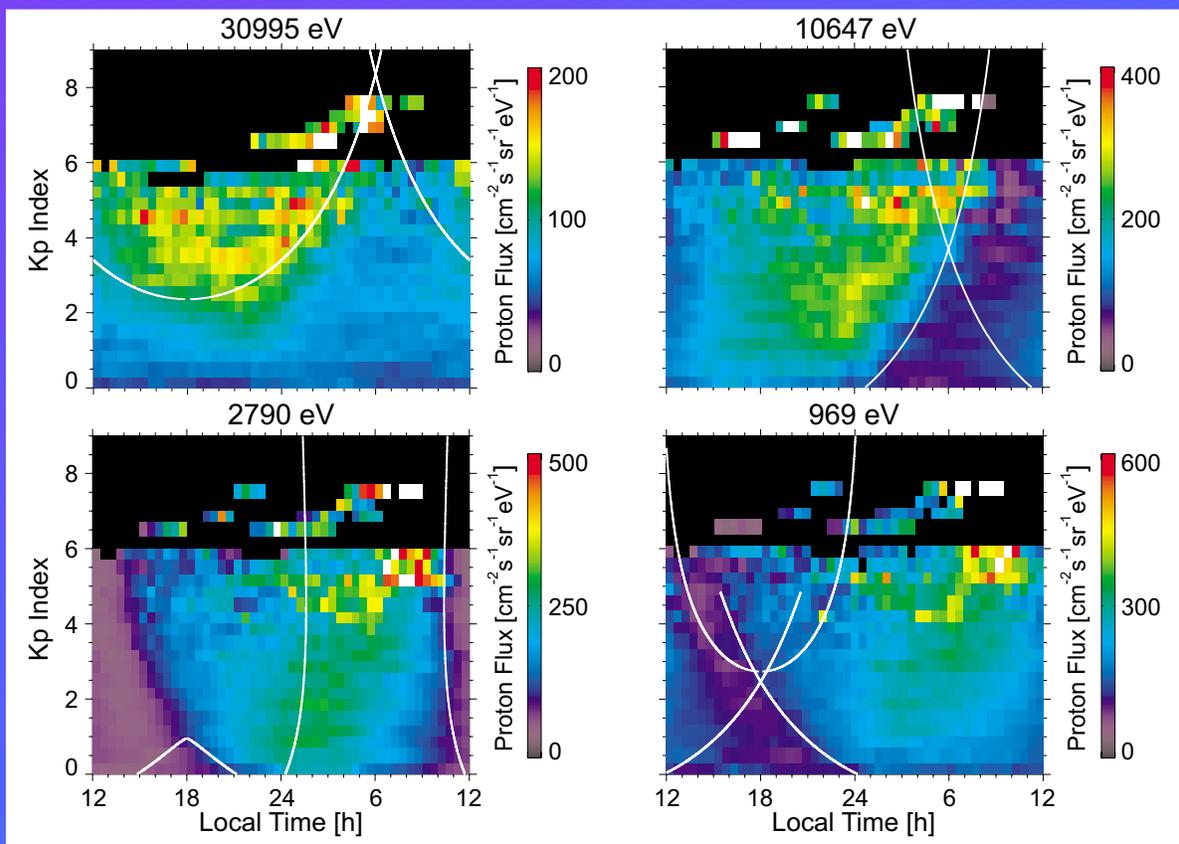
Das MPA Instrument

- MPA = Magnetospheric Plasma Analyzer.
 - 40 Energiekanäle mit logarithmischen Abständen.
 - Energiebereich: $1 \text{ eV}/q \lesssim E_{p,e} \lesssim 40 \text{ keV}/q$.
 - 6 Detektoren decken polare Winkel von 25° bis 155° ab.
 - 10-s Spinperiode ermöglicht Messungen azimuthaler Richtung mit 15° Schrittweite.
- ⇒ Komplette 3-D Verteilung (40 Energies x 24 Azimuths x 6 Polar Angles)!



Statistik der MPA-Daten

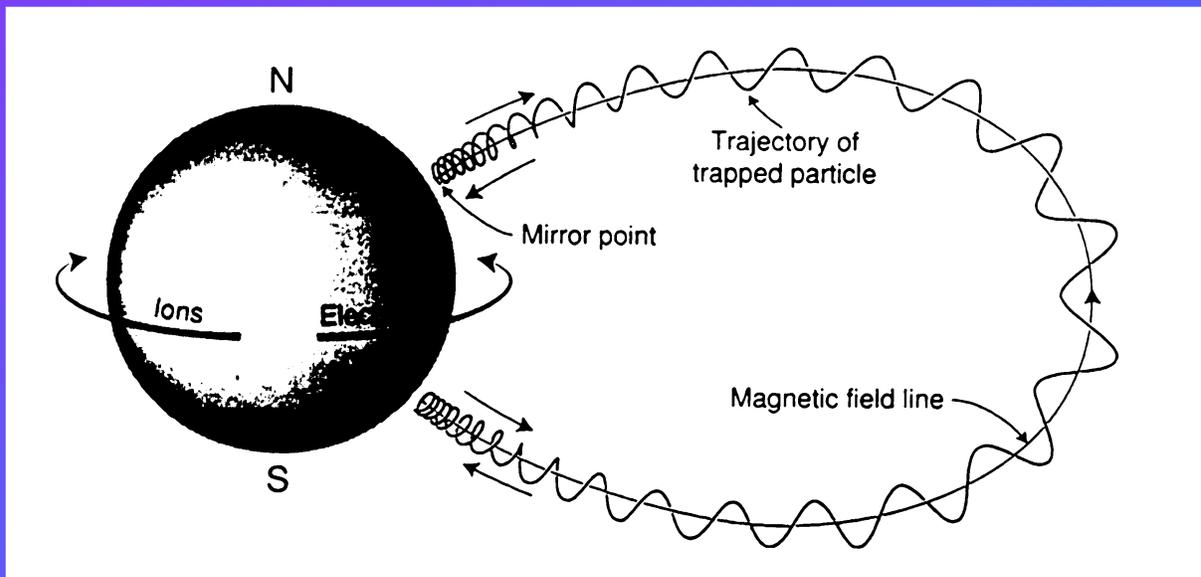
- Ein Jahr Daten von **drei** geostationären Satelliten ergibt **eine Million** Meßwerte.
- Spingemittelte differenzielle Fluß Statistik (j) für 1996:



- Phasenraumdichte $f \sim j/E$.

Teilchenbewegung in der Magnetosphäre

- Bewegungsgleichung: $m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$.
- Gyrationen-, Bounce- und Driftbewegung:



- Driftgeschwindigkeit des Führungszentrums:

$$\mathbf{v}_D = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} + \frac{\mathbf{F}_{\text{ext}} \times \mathbf{B}}{q B^2} + \frac{W_{\perp} \mathbf{B} \times \nabla B}{q B^3} + \frac{2W_{\parallel} \mathbf{r}_c \times \mathbf{B}}{q R_c B^2}$$

Driftbahnen geladener Teilchen

- Driftgeschwindigkeit des Führungszentrums:

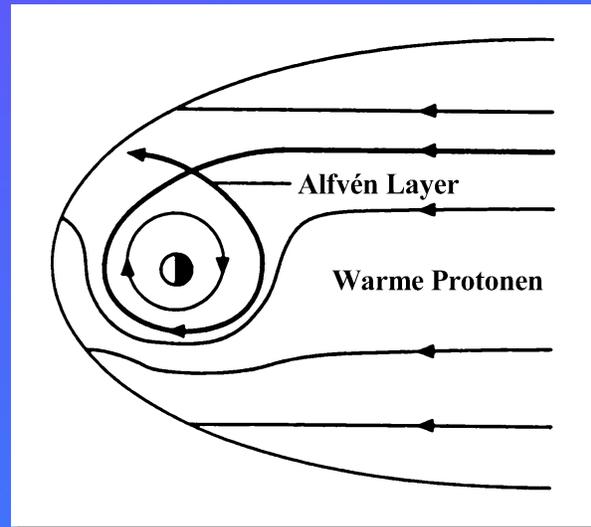
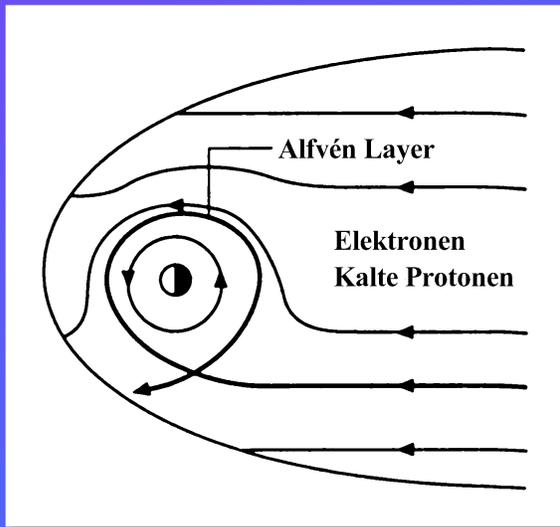
$$\mathbf{v}_D = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} + \frac{\mathbf{F}_{\text{ext}} \times \mathbf{B}}{q B^2} + \frac{W_{\perp} \mathbf{B} \times \nabla B}{q B^3} + \frac{2W_{\parallel} \mathbf{r}_c \times \mathbf{B}}{q R_c B^2}$$

- Driftbahnen:

Elektronen

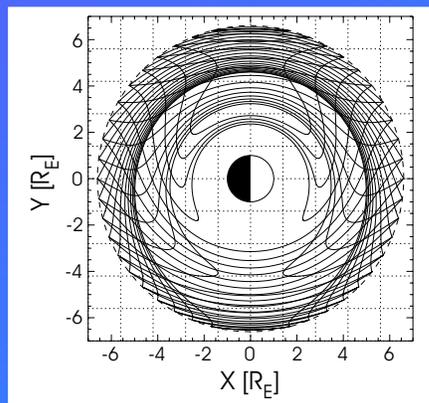
Kalte Protonen

Warme Protonen



Globales Driftpfad-Schema

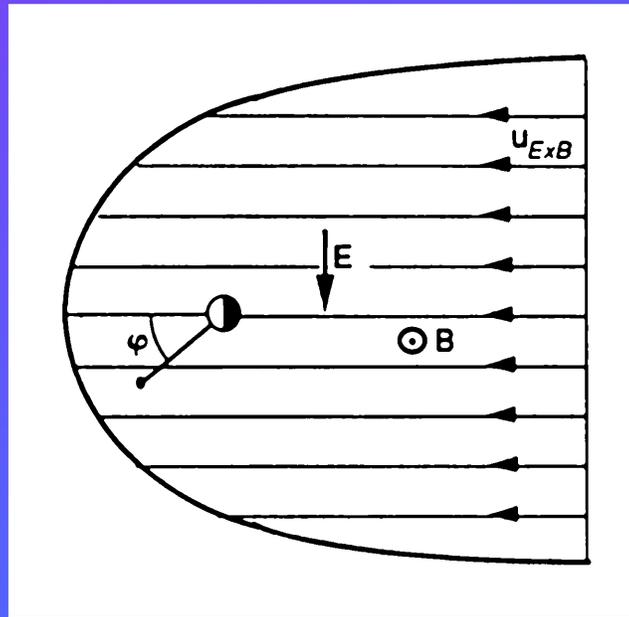
- Gute Abdeckung der inneren Magnetosphäre durch Variation der **Energie**, der **Lokalzeit** und des **Kp-Wertes**.
- Nur **offene Driftpfade** werden berücksichtigt.
- Magnetfeldmodelle:
 - Dipol,
 - McIlwain M2 (McCormac, 1972).
- Modelle des elektrischen Feldes:
 - Volland-Stern (JGR, 595, 1975),
 - McIlwain E5D (ASR, 187, 1986),
 - Weimer 96 (GRL, 2549, 1996).
- Beispiel: Dipol / Volland-Stern Trajektorien.



Das Volland-Stern Modell

- Analytisches Modell.

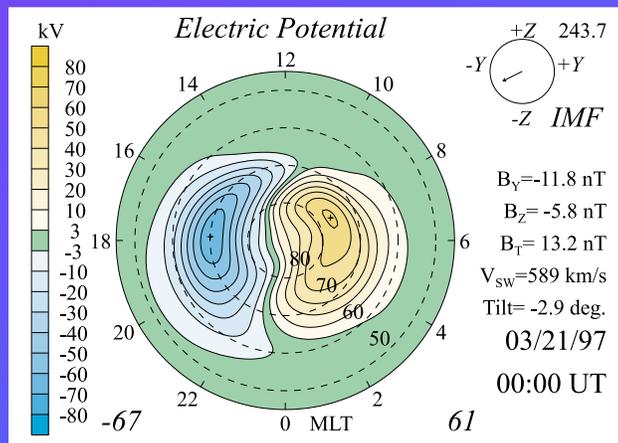
- Elektrisches Potential: $U = -\frac{a}{r} - br^\gamma \sin(\phi)$.



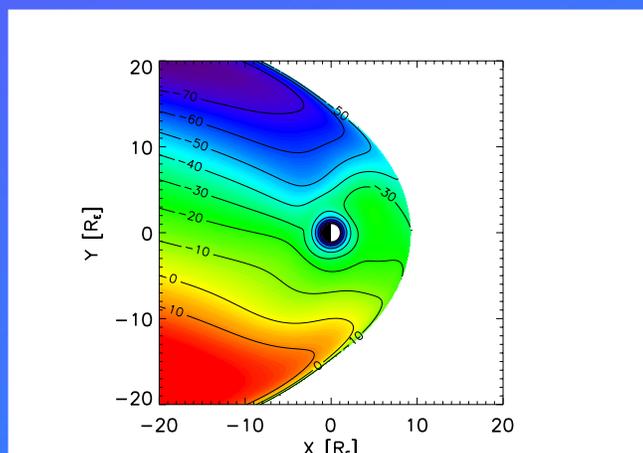
- Maynard und Chen (OGO 3+5), (*JGR*, 1009, 1975):
 $b = 0.045 / (1 - 0.159 K_p + 0.0093 K_p^2)^3 \quad (\gamma = 2)$.

Das Weimer 96 Modell

- Parameter: v_{SW} , IMF B_y und B_z , Dipol-Tiltwinkel.
- Reduzieren aller Parameter auf K_p .
- Elektrisches Potential in der Ionosphäre:



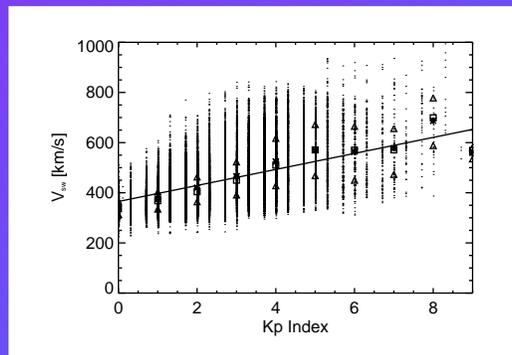
- Projektion der Potentialwerte entlang der Magnetfeldlinien in die Equatorebene:



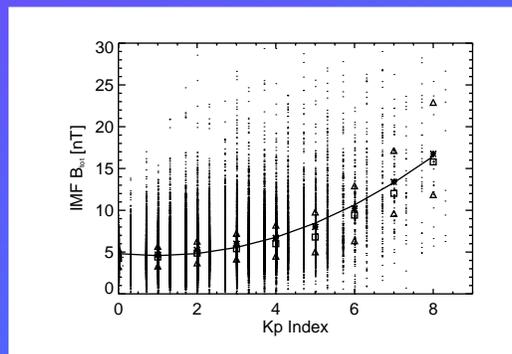
Kp-Parametrisierung des Weimer Modells

(Quelle: NSSDC OMNIWeb)

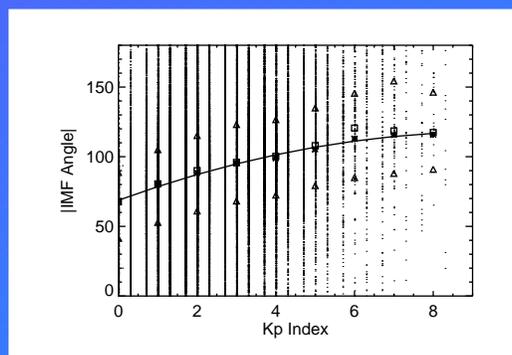
- Sonnenwind Geschwindigkeit: $v_{sw} = 365 + 32 Kp$.



- Feldstärke des IMF: $B_t = 4.81 - 0.48 Kp + 0.24 Kp^2$.



- IMF Winkel: $\alpha = 68.7 + 10.3 Kp - 0.5 Kp^2$.



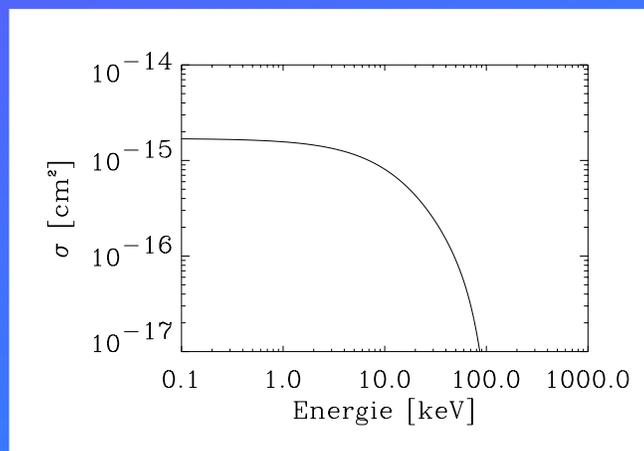
Ladungsaustausch

- Liouville'sches Theorem: Die Phasenraumdichte entlang einer Teilchendriftbahn ist konstant.
- Prozeß: $H_E^+ + H \rightarrow H_E + H^+$.
- Verluste der Phasenraumdichte:

$$f_{\text{out}} = f_{\text{in}} \exp \left(- \int \alpha \, ds \right),$$

wobei $\alpha = \sigma v_{\text{th}} n_{\text{H}}$ der Verlustkoeffizient mit σ Ladungsaustausch-Querschnitt, v_{th} thermischer Geschwindigkeit, n_{H} Neutralteilchendichte ist.

- Der Ladungsaustausch-Querschnitt ist energieabhängig:



Inversion

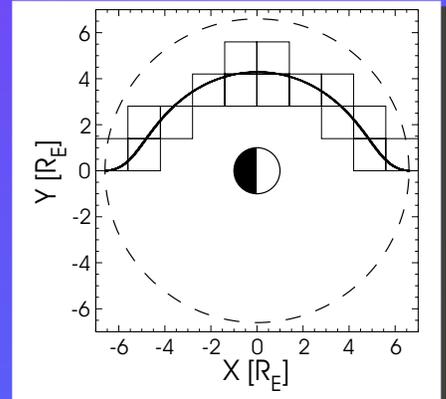
- Diskretisierung der Flußabnahme \Rightarrow LGS:

$$\underbrace{\sum_i \sigma_i v_{th,i} \Delta t_i}_{\mathbf{A}} \underbrace{n_{H,i}}_{\vec{m}} = \underbrace{\ln \left(\frac{f_{in}}{f_{out}} \right)}_{\vec{d}},$$

wobei \mathbf{A} die Driftpfade,

\vec{d} die Flußverhältnisse und

\vec{m} die Neutraldichten beinhaltet.

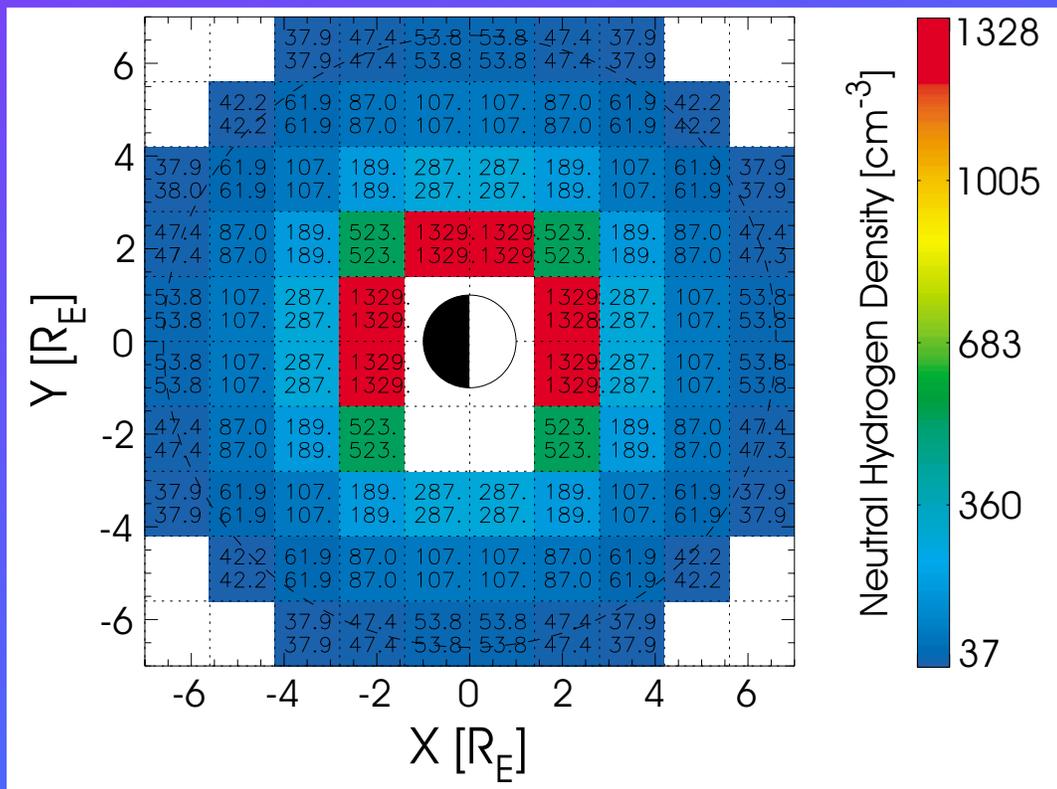


- Die Matrix \mathbf{A} ist invertierbar, wenn sie **quadratisch** und **regulär** ist.
- Quadratisch: $(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \vec{m} = \mathbf{A}^T \vec{d}$.
- Regulär: $(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{E}) \vec{m} = \mathbf{A}^T \vec{d}$.
- Die Neutralteilchendichten sind gegeben durch:

$$\vec{m} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{E})^{-1} \mathbf{A}^T \vec{d}.$$

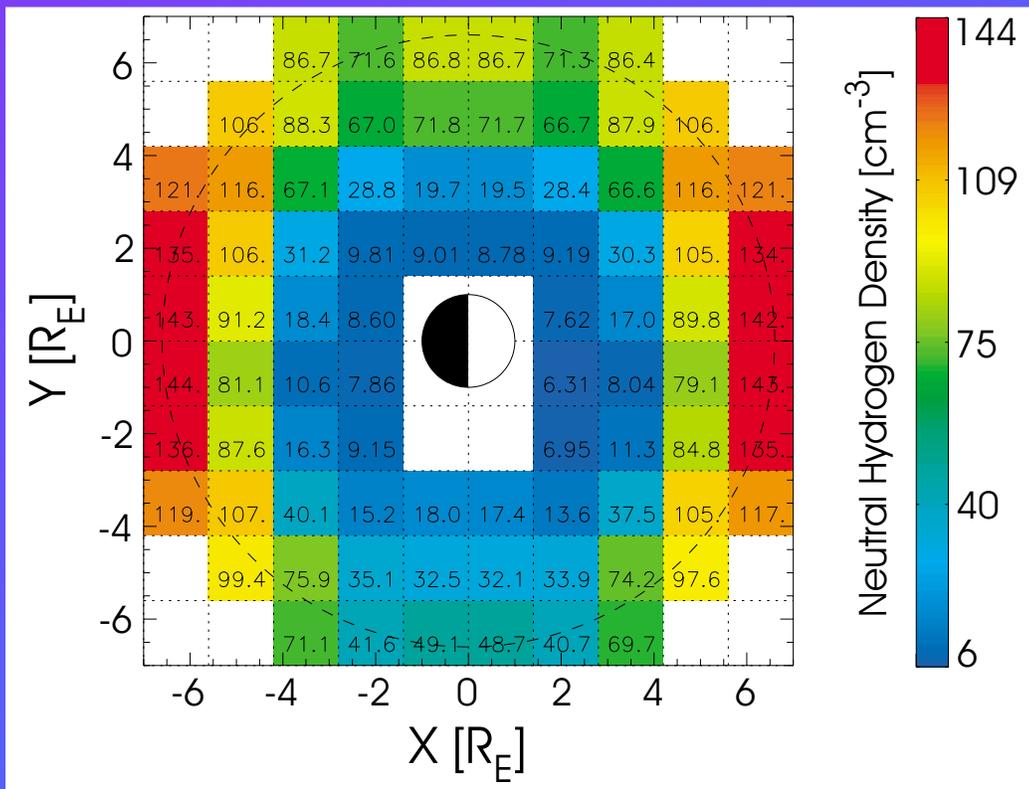
Inversion der Vorwärtsrechnung

- Verteilung der exosphärischen Neutralteilchen: Chamberlain Modell mit Rairden 86 Parametern.
- Inversion der Vorwärtsrechnung:



Inversion: Dipol / Volland-Stern

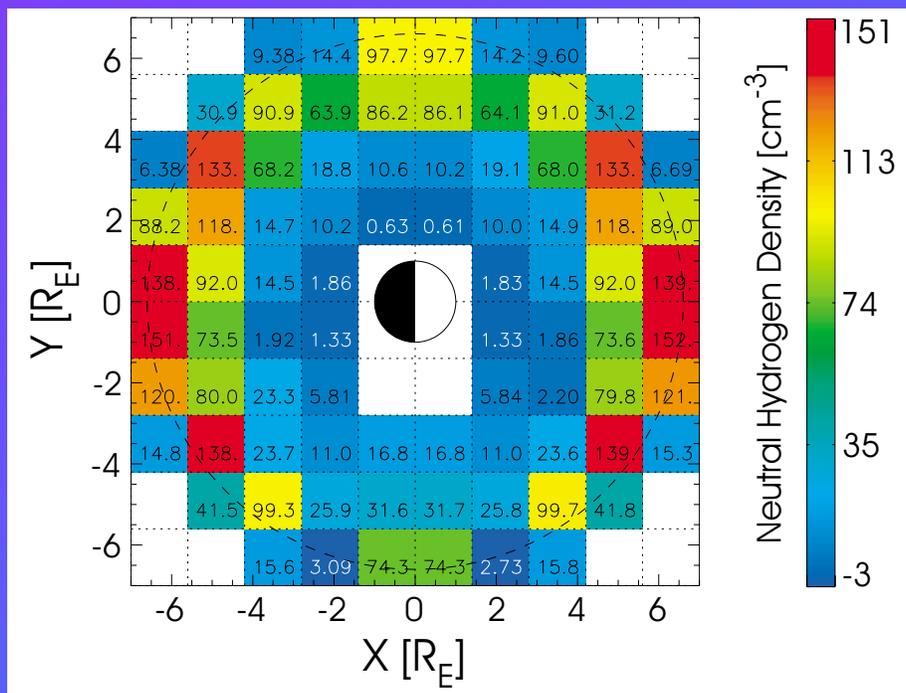
- Invertierte Neutralteilchendichten:



- Die Inversion zeigt Dichten in Erdnähe, die wesentlich geringer als die Chamberlain-Dichten sind.

Die Nebenbedingungen

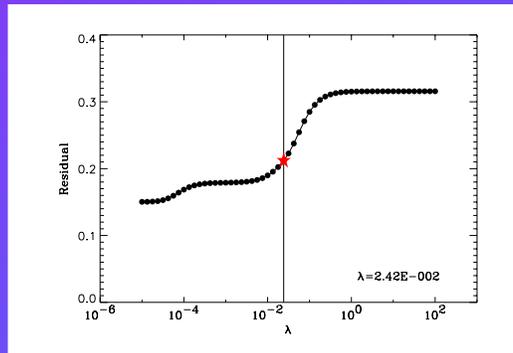
- Die Nebenbedingungen λE garantieren eine reguläre Matrix, die Lösung des LGS kann aber *unphysikalisch* sein:



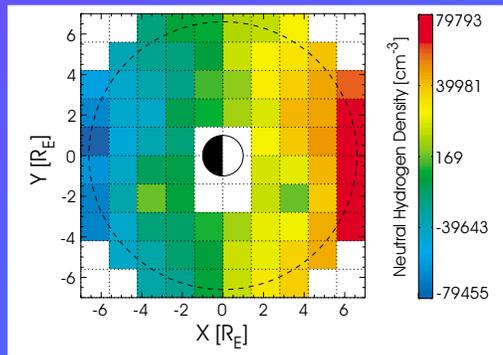
- Sinnvoller sind Nebenbedingungen, die in benachbarten Regionen ähnliche Dichten erzwingen.
- Andere mögliche Nebenbedingungen:
 - Azimuthale NB,
 - Radiale NB,
 - Positivität erzwingende NB.

Der Gewichtungsfaktor

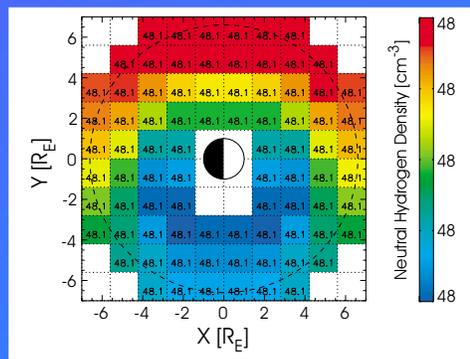
- Wahl des Gewichtungsfaktors λ :



- λ zu klein \Rightarrow Noise in den Daten dominiert.

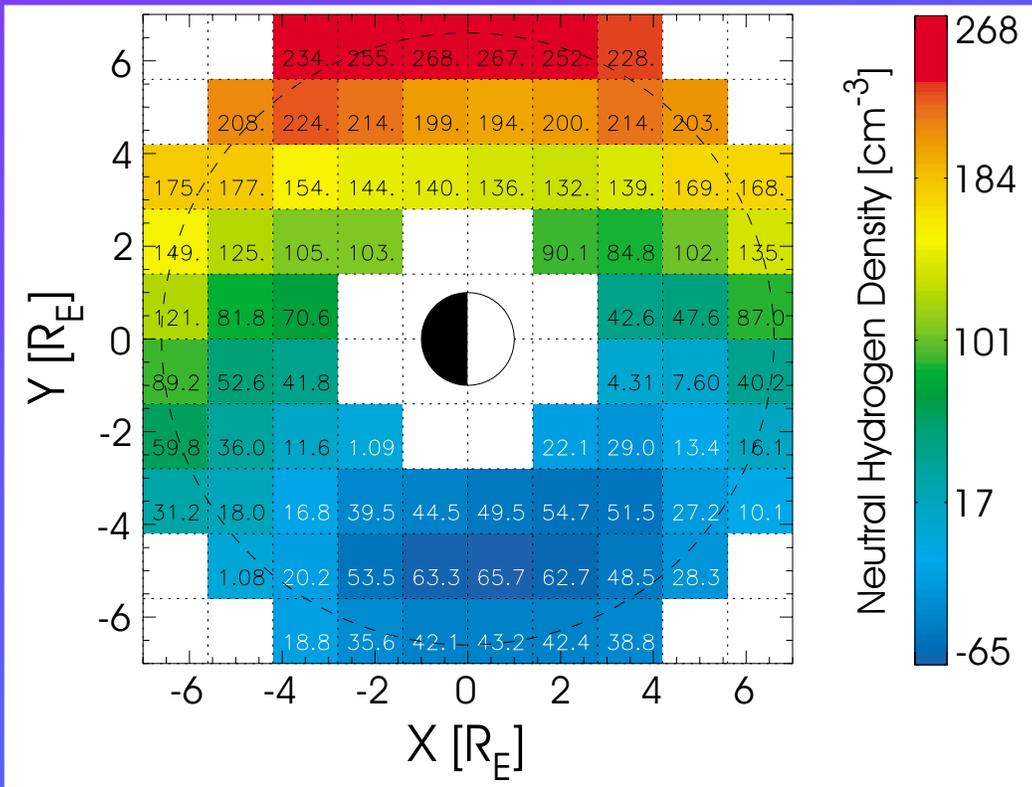


- λ zu groß \Rightarrow Mittlere Dichte.



Inversion: McIlwain M2 / E5D

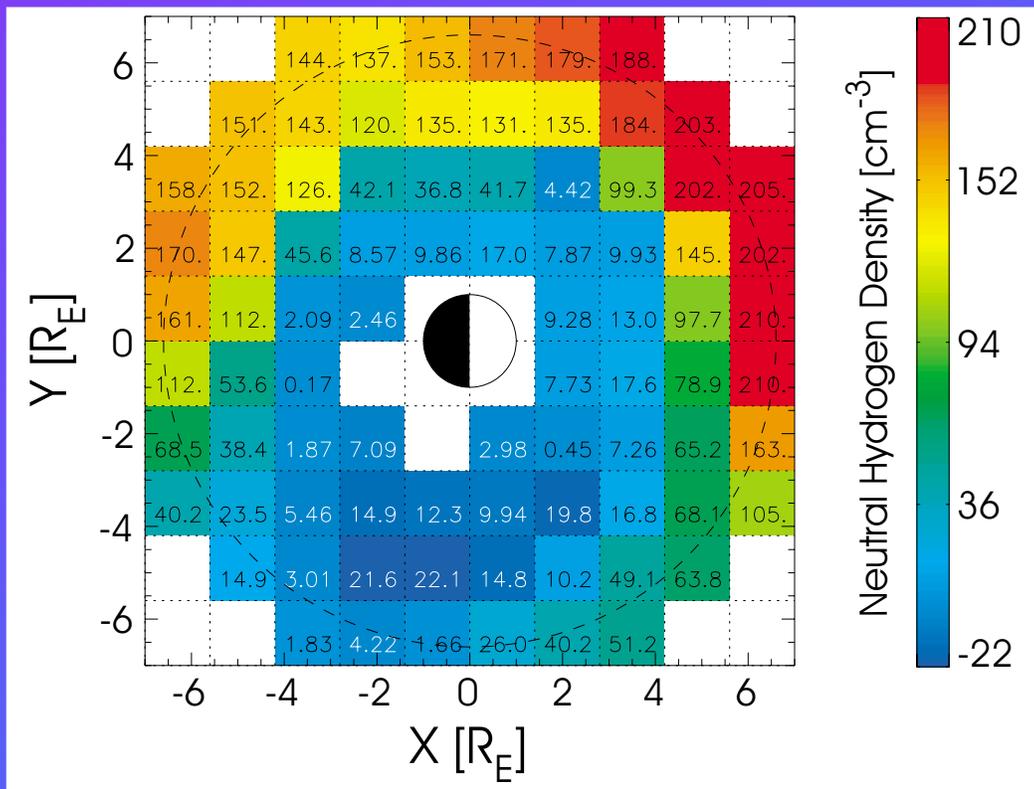
- Invertierte Neutralteilchendichten:



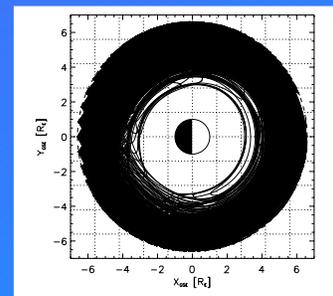
- *Negative* Dichten im Morgensektor ⇒ Quellen.

Inversion: Dipol / Weimer 96

- Invertierte Neutralteilchendichten:

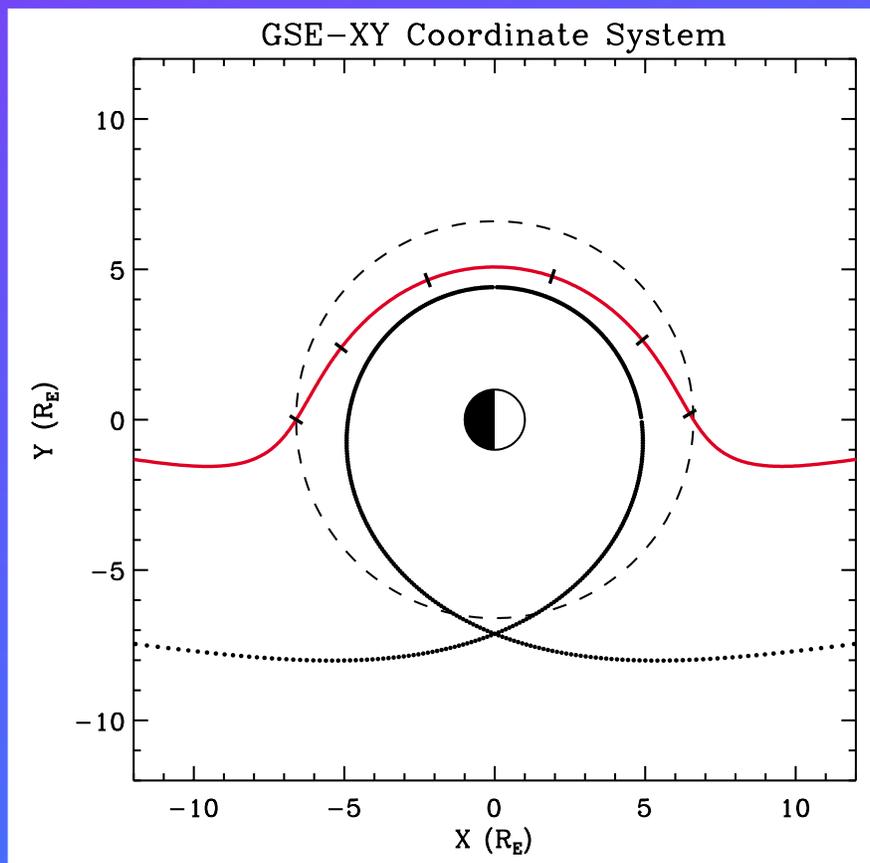


- Quellen im Morgensektor.
- Schlechte Auflösung in Erdnähe.



Erdentfernte Trajektorien

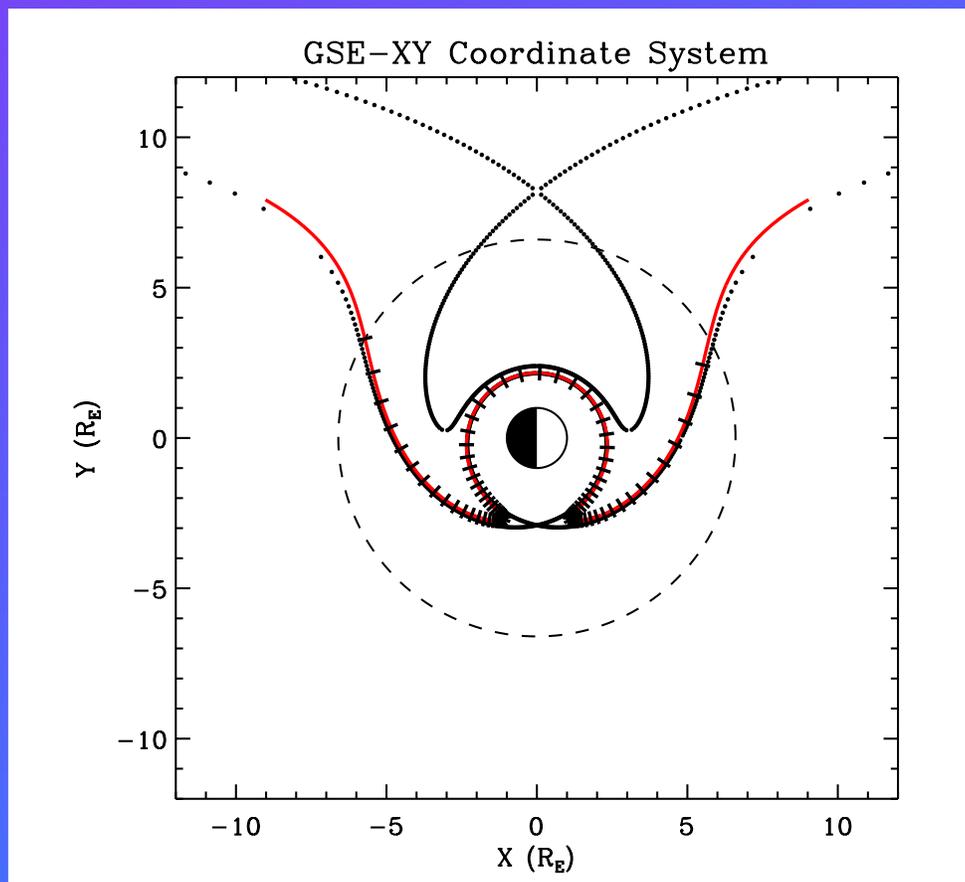
- Hohe Energien.
- Beispiel: 10 keV @ $6.6 R_E$, 24 LT, $K_p = 3$.



- Protonen-Driftzeit: ~ 5 Stunden.

Erdnahe Trajektorien

- Geringe Energien.
- Beispiel: 1 keV @ 6.6 R_E , 22 LT, $K_p=3$.



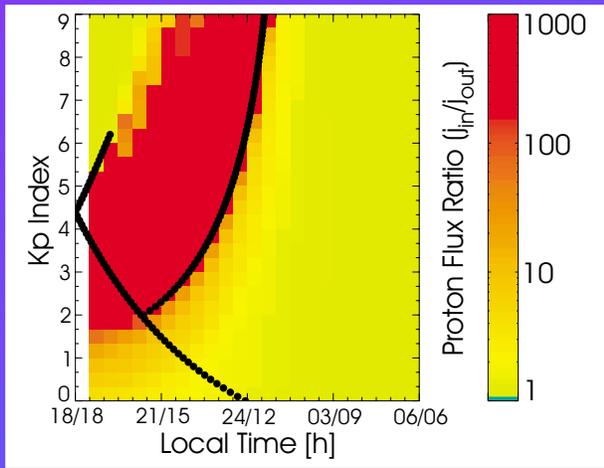
- Protonen-Driftzeit: ~ 3.5 Tage.

Vergleich: Modell / Daten

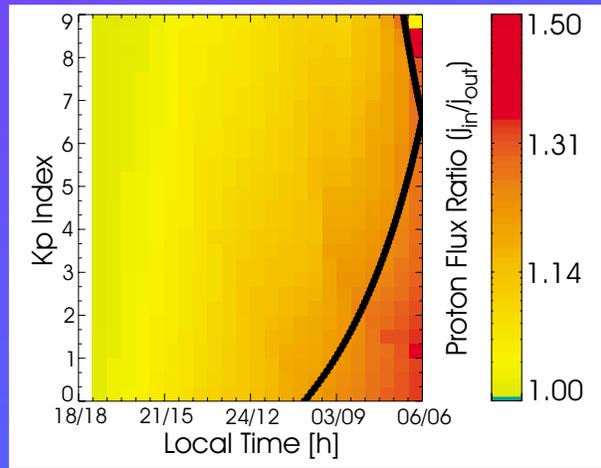
(Modell: Dipol / Volland-Stern)

Simulierte Verlustraten

1 keV

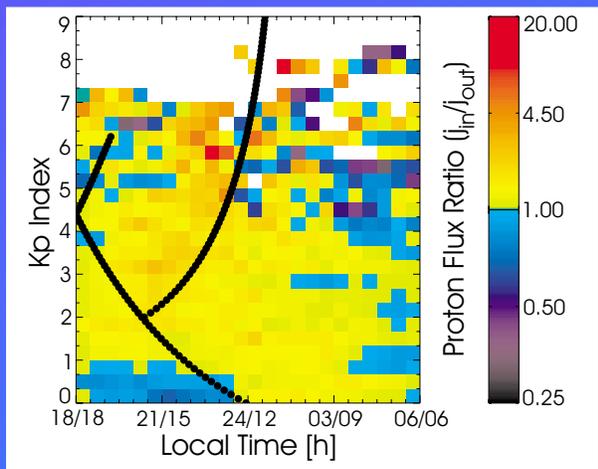


10 keV

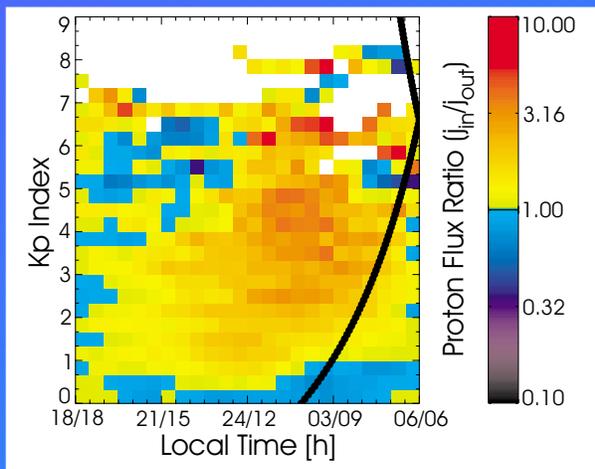


Gemessene Verlustraten

1 keV



10 keV



Zusammenfassung

- Der Tomographie-Algorithmus wurde durch Inversion synthetischer Daten erfolgreich getestet.
- Die Verteilung der Neutraldichte der invertierten MPA-Daten weist große Unterschiede zum Chamberlain-Modell auf.
- Die Verteilung ist modellabhängig.
- Geringe Dichten in Erdnähe werden durch Verluste verursacht, die um ein Vielfaches geringer sind als Simulationen ergeben.
- Dies kann bedeuten, daß...
 - die wahre Neutraldichte in Erdnähe geringer als durch das Chamberlain-Modell gegeben ist.
 - es Quellen in Erdnähe gibt.
 - die Driftpfade mehr als erwartet abgeschirmt werden, und Teilchen somit die Erde bei größeren Entfernungen passieren.